

А. В. ЗОНОВ

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ И ПРИРОДНОГО ГАЗА
НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЕЙ 4Ч 11,0/12,5
И 4ЧН 11,0/12,5 С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ УСТАНОВОЧНОГО УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ
ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА**

***Ключевые слова:** дизельный двигатель, природный газ, промежуточное охлаждение наддувочного воздуха, токсичность, угол опережения впрыскивания топлива, этанол, этанола-топливная эмульсия.*

***Аннотация.** В статье приведены результаты исследований по влиянию применения этанола-топливной эмульсии и применения природного газа на эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 и 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива.*

В данной статье рассмотрено влияние применения этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) на эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 и влияние применения природного газа (ПГ) на эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива. Для каждого двигателя при работе на альтернативном топливе получены регулировочные характеристики со снятием и обработкой ряда нагрузочных характеристик, подобрано оптимальное значение установочного угла опережения впрыскивания топлива. Статья содержит результаты исследований, проведенных на двигателях 4Ч 11,0/12,5 при работе на альтернативном топливе – этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) и 4ЧН 11,0/12,5 при работе на природном газе (ПГ) с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Представлены экспериментальные и расчетно-теоретические исследования мощностных и эффективных показате-

лей дизелей, работающих на альтернативных топливах (ЭТЭ и ПГ).

Рабочие процессы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на этаноло-топливной эмульсии (ЭТЭ) и дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с принудительным охлаждением наддувочного воздуха (ПОНВ) при работе на природном газе (ПГ) исследованы в соответствии с целью, задачами исследований и методикой, проведены стендовые испытания [3, 4, 5, 6].

Регулировочные характеристики для определения эффективных показателей дизеля 4Ч 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного угла опережения впрыскивания топлива (УОВТ) при работе дизеля на дизельном топливе (ДТ) и на ЭТЭ на номинальной частоте вращения коленчатого вала ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$) и на частоте вращения максимального крутящего момента ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) представлены на рисунке 1 [1, 2].

Рассматривая показатели работы двигателя на ДТ на номинальной частоте вращения ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$) при работе дизеля на установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 20^\circ$ до в.м.т., при постоянном часовом расходе ДТ $G_T = 13,4 \text{ кг/ч}$, эффективная мощность N_e составляет 53,8 кВт, а значение удельного эффективного расхода ДТ g_e составляет 240 г/(кВт·ч). При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 23^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e увеличивается до значения 55,8 кВт, при этом значение удельного эффективного расхода ДТ g_e снижается до 238 г/(кВт·ч.), т. е. на 0,83 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 26^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e уменьшается до значения 55,0 кВт, при этом значение удельного эффективного расхода ДТ g_e увеличивается до 243 г/(кВт·ч.), т. е. на 1,25 %. При дальнейшем увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 29^\circ$ до в.м.т. происходит снижение эффективной мощности N_e до значения 53,6 кВт, при этом значение удельного эффективного расхода g_e увеличивается до 255 г/(кВт·ч), т. е. на 6,25 %. Рассматривая графики N_e , G_T , и g_e , можно отметить, что при работе двигателя на ДТ установочный УОВТ при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ по условию наилучшей экономичности равен 23° до в.м.т. Этот установочный УОВТ рекомендован заводом-изготовителем для обеспечения лучших мощностных, экономических и экологических показателей автомобильного двигателя 4Ч 11,0/12,5 в качестве оптимального.

Рассматривая показатели работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе дизеля на ЭТЭ на номинальной частоте вращения ($n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,64 \text{ МПа}$), можно отметить, что при работе дизеля на установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 20^\circ$ до в.м.т., при постоянном суммарном часовом расходе топлива $G_{T\Sigma} = 11,0 \text{ кг/ч}$ эффективная мощность N_e составляет 55,2 кВт, а значение суммарного удельного эффективного расхода

топлива $g_{e\Sigma} = 202,0 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

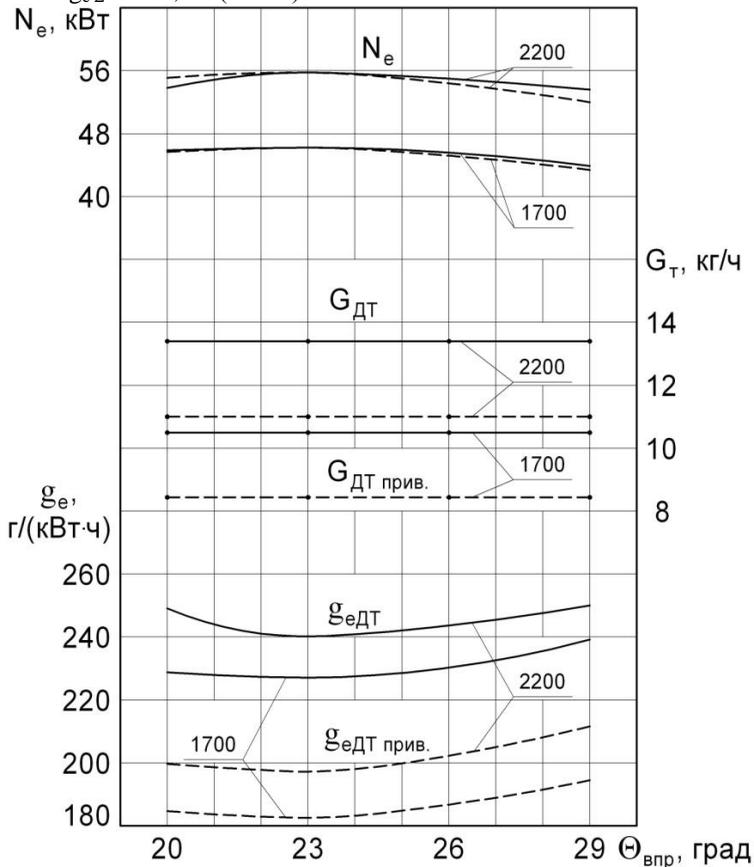


Рисунок 1 – Влияние применения ЭТЭ на эффективные показатели дизеля 4С 11,0/12,5 в зависимости от изменения установочного УОВТ при $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$, $p_c = 0,64 \text{ МПа}$, и $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_c = 0,69 \text{ МПа}$:
 ——— - дизельный процесс, - - - - ЭТЭ

При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 23^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e увеличивается до значения 55,8 кВт, при этом значение суммарного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ снижается до 200,0 г/(кВт·ч), т. е. на 1,0 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 26^\circ$ до в.м.т. происходит снижение эффективной мощности N_e до значения 54,4 кВт, при этом значение суммар-

ного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ увеличивается до 207,5 г/(кВт·ч), т. е. на 2,7 %. При дальнейшем увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 29^\circ$ до в.м.т. происходит снижение эффективной мощности N_e до значения 52,0 кВт, при этом значение суммарного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ увеличивается до 216,0 г/(кВт·ч), т. е. на 7,0 %. Снижение суммарных значений часового расхода $G_{T\Sigma}$ и удельного расхода $g_{e\Sigma}$ топлива при работе дизеля на всех установочных УОВТ на ЭТЭ по сравнению с работой на ДТ объясняется большим значением теплоты сгорания ЭТЭ. Из анализа графиков N_e , $G_{T\Sigma}$ и $g_{e\Sigma}$ следует, что при работе дизеля на ЭТЭ оптимальный установочный УОВТ при частоте вращения $n = 2200 \text{ мин}^{-1}$ по условию наилучшей экономичности равен 23° до в.м.т.

Анализируя графики работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму максимального крутящего момента ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ при $p_e = 0,69 \text{ МПа}$) при работе дизеля на ДТ, можно отметить, что при постоянном значении часового расхода ДТ $G_T = 11,1 \text{ кг/ч}$ при работе с установочным УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 20^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e составляет 47,5 кВт, при удельном расходе ДТ $g_e = 237 \text{ г/(кВт·ч)}$. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 23^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e уменьшается до значения 47,0 кВт, а величина удельного расхода ДТ g_e снижается и составляет 236 г/(кВт·ч). Уменьшение значения g_e составляет 0,43 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 26^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e уменьшается до значения 46,2 кВт, а величина удельного расхода ДТ g_e повышается и составляет 239 г/(кВт·ч). Увеличение значения g_e составляет 0,85 %. При дальнейшем увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 29^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e снижается до значения 45,6 кВт, а величина удельного расхода ДТ g_e увеличивается и составляет 244 г/(кВт·ч). Увеличение g_e составляет 3,00 %.

Рассматривая показатели работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на частоте вращения максимального крутящего момента ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$) при работе дизеля на ЭТЭ, можно отметить, что при установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 20^\circ$ до в.м.т., при постоянном суммарном часовом расходе топлива $G_{T\Sigma} = 8,8 \text{ кг/ч}$ эффективная мощность N_e составляет 46,0 кВт. Значение суммарного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ при данной мощности составляет 195,0 г/(кВт·ч). При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 23^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность увеличивается до значения $N_e = 46,5 \text{ кВт}$, а величина суммарного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ снижается и составляет 193,5 г/(кВт·ч). Уменьшение значения $g_{e\Sigma}$ составляет 0,77 %.

При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 26^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность N_e уменьшается до значения 45,5 кВт, а величина удельного расхода ДТ g_e повышается и составляет 201,0 г/(кВт·ч). Увеличение значения g_e составляет 3,10 %. При дальнейшем увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 29^\circ$ до в.м.т. эффективная мощность снижается до значения $N_e = 43,5$ кВт, а величина суммарного удельного эффективного расхода топлива $g_{e\Sigma}$ увеличивается и составляет 209,0 г/(кВт·ч). Увеличение значения g_e составляет 7,18 %. При частоте вращения, соответствующей максимальному крутящему моменту ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,69 \text{ МПа}$), сохраняется характер изменения кривых эффективной мощности и удельного эффективного расхода топлива, установленный для номинальной частоты вращения двигателя.

Из анализа кривых регулировочной характеристики по установочному УОВТ следует, что для всех режимов работы дизеля, исходя из минимального удельного расхода топлива g_e , при работе дизеля на ДТ оптимальным является установочный УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 23^\circ$ до в.м.т., а при работе дизеля на ЭТЭ $\Theta_{\text{впр гд}} = 23^\circ$ до в.м.т. При работе дизеля на более ранних УОВТ при работе дизеля на ЭТЭ на режимах, близких к номинальным нагрузкам, значение «жесткости» работы двигателя превышает норму, установленную заводом-изготовителем, т. е. $(dp/df)_{\text{max}}$ составляет более 1,0 МПа/град. При работе дизеля на более поздних установочных УОВТ на режимах номинальной нагрузки происходит интенсивное повышение температуры охлаждающей жидкости, следствием чего является перегрев двигателя.

Далее рассмотрим влияние применения природного газа (ПГ) на эффективные показатели дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ в зависимости от изменения установочного УОВТ. На рисунке 2 представлено изменение мощностных и экономических показателей дизеля в зависимости от изменения установочного УОВТ при работе на ДТ и ПГ на частотах вращения коленчатого вала 2400 мин^{-1} (номинальный скоростной режим) и 1700 мин^{-1} (режим максимального крутящего момента). Характеристики снимались для определения оптимального значения установочного УОВТ исходя из минимальной величины удельных эффективных расходов ДТ и ПГ. Регулировочная характеристика строилась после снятия и обработки нескольких нагрузочных характеристик, снятых на различных установочных УОВТ. При этом для построения брались точки N_e , g_e и $g_{e\Sigma}$ из нагрузочных характеристик с равными значениями часового расхода топлива G_T согласно ГОСТа.

Рассмотрим графики работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ на ДТ на номинальной частоте вращения коленчатого вала.

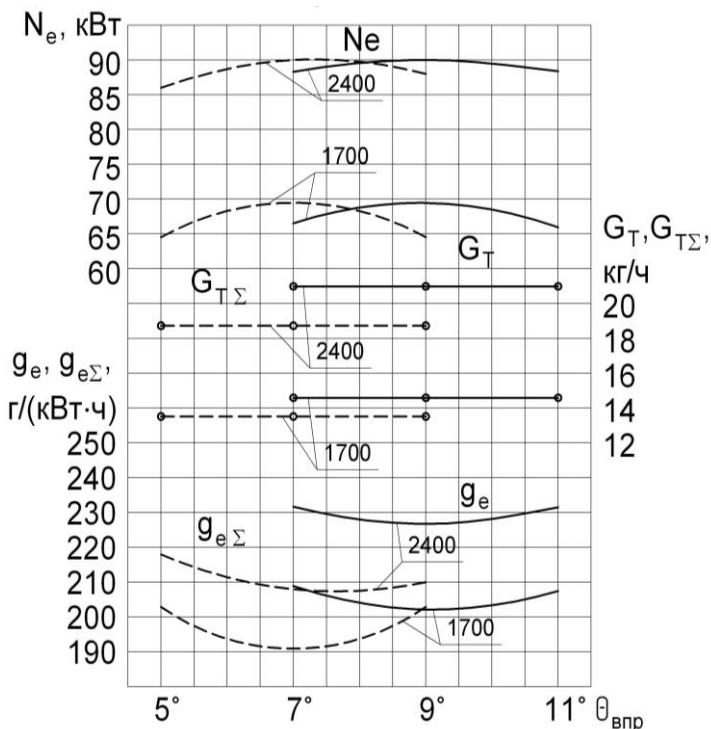


Рисунок 2 – Влияние применения ПГ на эффективные показатели двигателя 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ в зависимости от изменения установочного УОВТ: — — дизельный процесс, - - - - газодизельный процесс

Видим, что при постоянном значении часового расхода ДТ $G_T = 21$ кг/ч максимальная мощность $N_e = 90,0$ кВт достигается при установочном УОВТ $\Theta_{впр д} = 9^\circ$, что совпадает с установочным УОВТ, рекомендованным заводом-изготовителем в качестве оптимального для данного двигателя. При этом значение удельного расхода ДТ составляет $g_e = 227$ г/кВт·ч. При уменьшении установочного УОВТ до $\Theta_{впр д} = 7^\circ$, при постоянном часовом расходе ДТ G_T эффективная мощность снижается до значения $N_e = 88,3$ кВт, при этом значение удельного расхода ДТ составляет $g_e = 232$ г/кВт·ч. Увеличение значения g_e составляет 2,2 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{впр д} = 11^\circ$ эффективная мощность также снижается до значения $N_e = 88,3$ кВт, при том же значении удельного расхода ДТ $g_e = 232$ г/кВт·ч.

Если рассматривать графики работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ на ПГ на номинальной частоте вращения коленчатого вала, то можно отметить, что при постоянном суммарном часовом расходе ДТ и ПГ $G_{T\Sigma} = 18,8$ кг/ч максимальная мощность $N_e = 90,0$ кВт достигается уже при установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 7^\circ$. При этом значение удельного суммарного расхода топлива составляет $g_{e\Sigma} = 208$ г/кВт·ч. Снижение значений часового расхода и удельного расхода топлива по сравнению с работой на ДТ объясняется большим значением теплоты сгорания ПГ. При уменьшении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 5^\circ$, при постоянном часовом расходе суммарного топлива $G_{T\Sigma}$ эффективная мощность снижается до значения $N_e = 86,0$ кВт. При этом значение удельного расхода топлива $g_{e\Sigma} = 218$ г/кВт·ч. Увеличение значения $g_{e\Sigma}$ составляет 4,8 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 9^\circ$ эффективная мощность снижается до значения $N_e = 88,0$ кВт, а значение удельного расхода топлива повышается до $g_{e\Sigma} = 210$ г/кВт·ч. Увеличение значения $g_{e\Sigma}$ составляет 1,0 %.

При рассмотрении графиков работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ на ДТ на частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму максимального крутящего момента ($n=1700$ мин⁻¹), можно отметить, что при постоянном значении часового расхода ДТ $G_T = 14,6$ кг/ч максимальная мощность $N_e = 69,5$ кВт достигается при установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 9^\circ$, как и на режиме номинальной мощности. При этом значение удельного расхода ДТ составляет $g_e = 202$ г/кВт·ч. При уменьшении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 7^\circ$ и постоянном часовом расходе ДТ G_T эффективная мощность снижается до значения $N_e = 66,5$ кВт. При этом значение удельного расхода ДТ $g_e = 209$ г/кВт·ч. Увеличение значения g_e составляет 3,5 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр д}} = 11^\circ$ эффективная мощность также снижается до значения $N_e = 66,0$ кВт, а величина удельного расхода ДТ составляет $g_e = 208$ г/кВт·ч. Увеличение значения g_e составляет 3,0 %.

Если рассматривать графики работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 с ПОНВ на ПГ на частоте вращения коленчатого вала, соответствующей режиму максимального крутящего момента ($n=1700$ мин⁻¹), то видим, что при постоянном значении часового расхода суммарного топлива $G_{T\Sigma} = 13,4$ кг/ч максимальная мощность $N_e = 69,5$ кВт достигается при установочном УОВТ $\Theta_{\text{впр гд}} = 7^\circ$, как и на режиме номинальной мощности. При этом значение удельного расхода суммарного топлива составляет $g_{e\Sigma} = 191$ г/кВт·ч. При уменьшении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 5^\circ$ и постоянном часовом расходе суммарного топлива $G_{T\Sigma}$ эффективная мощность снижается до значения $N_e = 64,5$ кВт, значение

удельного расхода суммарного топлива при этом составляет $g_{e\Sigma} = 203$ г/кВт·ч. Увеличение значения $g_{e\Sigma}$ составляет 6,3 %. При увеличении установочного УОВТ до $\Theta_{\text{впр гд}} = 9^\circ$ эффективная мощность снижается до значения $N_e = 64,5$ кВт. Значение $g_{e\Sigma}$ при этом равно 203 г/кВт·ч. Увеличение значения $g_{e\Sigma}$ относительно оптимального значения установочного УОВТ составляет 6,3 %.

Таким образом, анализируя регулировочную характеристику по установочному УОВТ, можно отметить, что для всех режимов работы дизеля, исходя из минимального удельного расхода топлива g_e , при работе на ДТ оптимальным является установочный УОВТ $\Theta_{\text{впр д}} = 9^\circ$, а при работе на ПГ $\Theta_{\text{впр гд}} = 7^\circ$. Также нужно учитывать, что высокофорсированные дизели очень чувствительны к установочному УОВТ. При установке более ранних УОВТ как при работе на ДТ, так и при работе на ПГ на режиме максимальной нагрузки значительно увеличивается «жесткость» работы двигателя, что сопровождается стуками в цилиндро-поршневой группе. При установке более поздних УОВТ, наблюдается недопустимое повышение температуры охлаждающей жидкости двигателя, что может привести к перегреву дизеля.

Обобщая исследования данных дизелей, можно сделать вывод, что применение альтернативных топлив (этаноло и природного газа) позволяет улучшить экологическую обстановку путем снижения выброса токсичных компонентов в отработавших газах как в России, так и во всем мире, экономить нефтяное топливо, а также улучшить мощностные и экономические показатели двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зонов А. В., Лиханов В. А., Чупраков А. И., Шаромов И. М. Влияние применения этанола-топливной эмульсии на эффективные показатели дизеля 4Ч 11,0/12,5 // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. № 4. С. 54–56.
2. Зонов А. В., Лиханов В. А., Чупраков А. И., Шаромов И. М. Влияние этанола на горания в цилиндре дизеля 4Ч 11,0/12,5 // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 3. С. 75–77.
3. Патент № 3002851 ФРГ, 02 М 67/14. Система впрыска спиртового и запального дизельного топлив // Открытия. Изобретения. 1981.
4. Перспективные автомобильные топлива / Пер. с англ.; под ред. Я. Б. Черткова. М. : Транспорт, 1986. 319 с.
5. Селиверстов В. М., Браславский М. И. Экономия топлива на речном флоте. М. : Транспорт, 1989. 231 с.
6. Селимов М. К., Абросимов А. А. Эколого-экономические аспекты развития производства моторных топлив в США. М. : ЦНИИТЭИнефтехим, 1991. 64 с.

THE INFLUENCE OF THE USE OF ETHANOL-FUEL EMULSION AND NATURAL GAS FOR EFFICIENT INDICATORS OF DIESELS 4Ч 11.0/12.5 AND 4ЧН 11.0/12.5 WITH INTERMEDIATE COOLING OF AIR IN DEPENDING ON POSITIONING ANGLE OF FUEL INJECTION TIMING

***Keywords:** the diesel engine, natural gas, intermediate cooling of air, toxicity, fuel injection timing angle, ethanol, ethanol-fuel emulsion.*

***Annotation.** In the article results of researches on influence of application ethanol-fuel emulsion and applications of natural gas on effective parameters of a diesel engines 4Ч 11,0/12,5 and 4ЧН 11,0/12,5, having intermediate cooling of air, depending on variation of positioning angle of an advancing of injection of fuel are resulted.*

This article considers the influence of the use of ethanol-fuel emulsion (ETE) to an effective performance diesel 4Ч 11,0/12,5 and influence the use of natural gas (NG) in the effective performance of a diesel engine 4ЧН 11,0/12,5 with aftercooling depending on changes in the installation angle fuel injection timing. For each engine at work on the alternative fuel control characteristics were conducted with the removal and processing of a number of load characteristics, choose the optimum value of the installation of fuel injection timing. This article contains the results of studies carried out on engines 4Ч 11,0/12,5 when working on alternative fuel – ethanol-fuel emulsion and 4ЧН 11,0/12,5 when running on natural gas with aftercooling. Experimental and computational and theoretical studies of power and efficient performance of diesel engines running on the alternate fuels (ETE and NG).

ЗОНОВ АНТОН ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и черчения, Вятский государственный университет, Россия, Киров (antonzonov@yandex.ru).

ZONOV ANTON VASILIEVICH – the candidate of technical sciences, the associate professor of the chair «Descriptive geometry and plotting», Vyatskiy state university, Russia, Kirov (antonzonov@yandex.ru).
